

# IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ENERGIA EÓLICA: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são compreendidas como as modificações das características climáticas por um longo período (décadas ou mais) (IPCC, 2014). O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2021 confirma que as atividades humanas são a principal causa do aquecimento global desde meados do século XX (IPCC, 2021). De acordo com o IPCC (2021), as mudanças climáticas têm impactos graves para o mundo, como por exemplo, aumento da temperatura global, aumento e maior frequência dos eventos extremos, aumento do nível do mar e modificações nos padrões de chuva. Além disso, há riscos para a segurança alimentar e hídrica.

As mudanças climáticas têm consequências importantes em escala global, podendo alterar os padrões climáticos e, com isso, influenciar a produção de energia eólica. Projeções nas modificações da produção eólica ocorrem em diferentes regiões pelo mundo. Segundo Martinez e Iglesias (2022) e Chen (2020) evidenciaram uma tendência de queda futura na densidade eólica nos Estados Unidos, por sua vez, os estudos de Johnson e Erhardt (2016) e Costoya *et al.* (2020) indicaram essa tendência negativa para costa leste dos Estados ao longo do século XXI. Projeções positivas também foram feitas, o Brasil, por exemplo, apresenta dados futuros positivos para o potencial eólico, principalmente na região Nordeste segundo Pereira *et al.* (2013), Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) e De Jong *et al.* (2019). A variabilidade dos resultados do potencial eólico pode ocorrer em uma mesma região, como ocorre observado nos estudos de Zhang e Li (2021), Costoya *et al.* (2021), e Wu *et al.* (2021), os quais evidenciam cenários de aumento e de redução no potencial eólico na China.

Desta forma, é imprescindível a aplicação de instrumentos capazes de fornecer dados a respeito das condições climáticas. Os modelos climáticos são a principal ferramenta computacional utilizada para se projetar dados climáticos. Os modelos foram desenvolvidos a partir de equações matemáticas que descrevem os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre, no oceano e na atmosfera (NOAA, 2017). Tais modelos levam em consideração o sistema terrestre e seus elementos. Os modelos climáticos globais e regionais se diferenciam em alguns pontos, principalmente, com relação a resolução. No caso dos modelos climáticos globais, eles foram desenvolvidos para realizar simulações em escala global, com resolução acima de 100 km, por sua vez, os modelos climáticos regionais se ajustam a áreas específicas com resoluções de 10 km, 50 km, por exemplo (Chen, 2020; Martinez e Iglesias, 2021; Martinez e Iglesias, 2022).

Os impactos das mudanças climáticas têm despertado uma crescente preocupação com os possíveis impactos na matriz energética acentuando a urgência nos investimentos em fontes não poluentes. Sendo assim, o presente artigo reporta uma análise bibliométrica, que pode ser entendida como um processo rigoroso aplicado para investigar uma ampla quantidade de dados científicos. A partir da aplicação de técnicas quantitativas é possível identificar particularidades e áreas que estão crescendo dentro da temática definida (Donthu *et al.*, 2021). O presente estudo realizou uma análise nas publicações em que o ponto principal foi a relação entre o impacto das mudanças climáticas na produção energética eólica com ênfase no uso de modelos climáticos.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo usou como base a metodologia proposta por Tranfield, Denyer e Smart (2003), revisão sistemática da literatura, a qual leva em consideração as seguintes etapas: (I) de plano de revisão, (II) condução da pesquisa e (III) relatório e divulgação.

A pesquisa foi realizada a partir da utilização de dois bancos de dados, o *Web of Science* Coleção Principal (*Clarivate Analytics*) e o *Science Direct*. Inicialmente, no *Web of Science* foi aplicado o seguinte conjunto de palavras-chaves: “*climat\* model\**” AND “*climat\* change\**” AND “*wind\* energy\**”. Como o banco de dados *Science Direct* não suporta símbolos coringas, como o asterisco (\*), as palavras foram aplicadas da seguinte forma: “*climate model*” AND “*climate change*” AND “*wind energy*”. Como o propósito inicial é selecionar artigos os quais apresentem as palavras-chaves pré-selecionadas de forma simultânea aplicou-se o conectivo “and”. A pesquisa se restringiu a estudos publicados em periódicos internacionais, excluindo-se os artigos publicados em congressos e simpósios.

Por fim, foram extraídos utilizando o Excel em que se realizou a tabulação das informações básicas, como, por exemplo, ano da publicação, periódicos em que os estudos foram publicados, modelos climáticos empregados e cenários climáticos aplicados.

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os 126 estudos selecionados e analisados foram publicados entre os anos de 2017 a 2023. As análises evidenciaram que ao agrupar as publicações em três períodos há uma tendência de crescimento do número de estudos realizados. Isso pode ser resultado da crescente preocupação com os impactos negativos que as mudanças climáticas podem e já causam na sociedade, e, nestes casos, especialmente na preocupação com a geração de energia eólica.

Entre 2005 e 2011, poucos artigos foram publicados com um total que representa apenas 10,3% da amostra, o equivalente a 13 estudos. Por sua vez, o período entre 2012 e 2017 apresentou um crescimento acentuado, com a publicação de 27 estudos, o que corresponde a 21,4% das amostras. Por fim, entre 2018 e 2023 a quantidade de estudos publicados continuou aumentando, sendo 86 estudos publicados o que representa 68,3% das amostras.

Os dois periódicos que mais publicaram estudos a respeito do tema concentraram 27,1% dos artigos da amostra. Primeiro, a *Renewable Energy* publicou 20 estudos (15,9% da amostra) e possui um fator de impacto de 8.7 e o segundo, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* com 11 estudos (8,7% das amostras) e fator de impacto de 15.9.

Entre os 126 estudos, 15 artigos foram dedicados ao estudo dos mares, representando 11,5% do total de amostras analisadas nessa categoria.

Entre os estudos analisados, dois discutiram a respeito do recurso eólico na região do Ártico (Akperov *et al.*, 2022; Akperov *et al.*, 2023). Por sua vez, apenas 3 estudos investigaram o potencial eólico em todo o mundo, o que representa apenas 2,3% da amostra (Zhang *et al.*, 2018; Jung e Schindler, 2019; Da Silva *et al.*, 2021).

Ao realizar a análise dos artigos, observou-se que a maior parte dos estudos foram publicados no continente europeu, 49 artigos (37,7% da amostra). Em seguida, os trabalhos nos continentes americano e asiático apresentaram, respectivamente, 25 e 21 dos estudos, o que representa 19,2% e 16,2% respectivamente.

Ressalta-se que no caso dos artigos no continente americano, apenas 4 retrataram o recurso eólico no Brasil (Lucena *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2013; Ruffato-Ferreira *et al.*, 2017; De Jong *et al.*, 2019). Além disso, para o continente asiático a maioria dos trabalhos foram realizados no território da Chi, 12 estudos. Além do realizado no Mar da China Meridional (He *et al.*, 2023). O continente africano apresentou apenas 10 estudos, o que representou 7,7% dos artigos analisados.

A partir da análise dos artigos, observou-se que os cenários RCP8.5 e RCP4.5 foram os mais empregados, sendo o mais antigo o estudo de Jiang *et al.* (2010). Ressalta-se que a maior parte dos estudos que utilizaram os cenários RCP4.5 e o RCP8.5 os aplicaram juntos. Isso pode ser reflexo do fato de os cenários, respectivamente, representarem um cenário intermediário e um cenário pessimista. Isso também ocorreu em alguns estudos que aplicaram os cenários

SSP2-4.5 (emissões intermediárias) e o SSP5-8.5 (emissões muito altas). Esses cenários foram destacados no Relatório do IPCC de 2021.

Os estudos analisados no presente trabalho que aplicaram os cenários AR6 começaram a ser publicados no ano de 2019, que foi o artigo de Jung e Schindler (2019). Notavelmente, todos os estudos que aplicaram o SSP2-4.5 também aplicaram o cenário SSP5-8.5, com exceção, do artigo de Jankeviciene e Kanapickas (2023). Além disso, o estudo de Moradian, Akbari e Iglesias (2022) foi o único que utilizou os cenários SSP5-8.5, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0, SSP1-2.6 e SSP1-1.9, inclusive, é o único estudo que aplica o SSP4-6.0 que corresponde a um forçamento médio (IPCC, 2021).

Evidenciou-se que os artigos publicados nos de 2005-2006, 2008-2009 e 2011-2013 utilizaram apenas os cenários do relatório AR3. O estudo mais recentemente publicado que aplicou os cenários do AR3, os cenários A1B e A2, foi o de Podrascanin e Djurdjevic (2020), que também utilizou o cenário RCP8.5. "O A1B representa um cenário de equilíbrio em todas as fontes, ou seja, não haveria uma dependência a uma fonte energética específica, por sua vez, o A2 é um cenário que um mundo bastante heterogêneo. Além disso, o desenvolvimento econômico seria orientado regionalmente e as mudanças tecnológicas seriam mais lentas (IPCC, 2001).

Os cinco modelos climáticos globais mais frequentemente empregados foram aplicados em pelo menos 20 estudos. Esses cinco modelos foram desenvolvidos em institutos europeus. O EC-Earth foi desenvolvido em colaboração entre vários institutos europeus, HadGEM2-ES e um instituto no Reino Unido, o MPI-ESM-LR foi desenvolvido na Alemanha e os modelos CNRM-CM5 e o IPSL-CM5A-MR desenvolvidos em institutos franceses.

O EC-Earth e o HadGEM2-ES foram os modelos mais aplicados nos estudos analisados, utilizados em 68 e 67 estudos, respectivamente. O EC-Earth foi desenvolvido a partir do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) e pelo Instituto Real Meteorológico dos Países Baixos (KNMI). É um modelo que incorpora um sistema atmosférico-oceano-mar-gelo completo (Hazeleger *et al.*, 2011).

O modelo HadGEM2-ES apresenta resolução horizontal de  $1.250^{\circ} \times 1.875^{\circ}$  lon x lat e foi desenvolvido pelo Instituto *Met Office Hadley Centre*, no Reino Unido. O HadGM2-ES é uma versão melhorada do HadGEM1 que traz evoluções na precipitação total, umidade, quantidade de nuvens e propriedades radiativas, principalmente nos trópicos. Além do mais, apresenta uma estratosfera bem resolvida e componentes do sistema terrestre a qual agrega o ciclo de carbono terrestre e oceânico e a química da atmosfera.

Os quatro modelos climáticos regionais mais aplicados foram utilizados em pelo menos 11 estudos. Os modelos RCA4 e HIRHAM5 foram usados em 26 e 14 artigos, respectivamente.

Observa-se que os estudos aplicaram diferentes versões dos modelos climáticos regionais. Agrupando as diferentes versões dos modelos climáticos regionais percebe-se que as versões do RCA (RCA3, RCA4, RCAO, SMHI-RCA4, SMHI-RCA4-v1 e RCA-GUESS) e do RegCM (RegCM3, RegCM4, RegCM4-2, RegCM4-6, RegCM4-7 e RegCM-v4) foram as mais utilizadas em 34 e 21 estudos respectivamente.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente estudo realizou uma revisão bibliométrica sobre as implicações das mudanças climáticas na energia eólica. Foram analisados 126 artigos publicados em periódicos internacionais.

A análise dos resultados indicou que o artigo mais antigo encontrado foi de 2005, e desde então houve um aumento significativo nas publicações sobre o tema. Sendo o período de

2018 a 2023 aquele com a maior quantidade de estudos publicados, com destaque para o ano de 2023.

A avaliação dos resultados evidenciou que a maioria dos estudos foi realizada na Europa, com destaque para artigos que abordaram a Península Ibérica. No continente asiático, a China foi o país mais estudado nesse contexto. Apesar de um número considerável de estudos realizados no continente americano, foram encontrados apenas quatro estudos relacionados ao Brasil. Além disso, dez estudos foram encontrados para o continente africano.

Os estudos utilizaram os cenários climáticos propostos pelo relatório do IPCC, sendo o RCP8.5 o mais utilizado nos estudos. Esse cenário representa uma perspectiva futura pessimista em relação à evolução das mudanças climáticas. Ademais, esses cenários foram utilizados em conjunto com modelos climáticos globais e regionais para realizar projeções futuras. Por fim, observou-se que os modelos mais amplamente aplicados foram desenvolvidos por instituições europeias.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa 167824/2022-8 e a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba Project 16/2022.

## REFERÊNCIAS

- AKPEROV, M. G *et al.* Wind Energy Potential in the Arctic and Subarctic Regions and Its Projected Change in the 21st Century Based on Regional Climate Model Simulations. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 47(6), p. 428–436, 2022. DOI: 10.3103/S1068373922060024.
- AKPEROV, M *et al.* Future projections of wind energy potentials in the arctic for the 21st century under the RCP8.5 scenario from regional climate models (Arctic-CORDEX). **Anthropocene**, v. 44. P. 100402, 2023. DOI: 10.1016/j.ancene.2023.100402.
- CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1428–1438, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.090>.
- COSTOYA, X *et al.* Climate change impacts on the future offshore wind energy resource in China. **Renewable Energy**, v. 175, p. 731–747, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.001>.
- COSTOYA, X.; ROCHA, A.; CARVALHO, D. Using bias-correction to improve future projections of offshore wind energy resource: A case study on the Iberian Peninsula. **Applied Energy**, v. 262, p. 114562, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114562>.
- DA SILVA *et al.* The implications of uncertain renewable resource potentials for global wind and solar electricity projections. **Environmental Research Letters**, v. 16, p. 124060, 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3c6b.
- DE JONG, P *et al.* Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390–401, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086>.
- DONTHU, N *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.
- HAZELEGER, W *et al.* EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. **Climate Dynamics**, v. 39, p. 2611–2629, 2011. DOI: 10.1007/s00382-011-1228-5.

HE, J. Y *et al.* Mapping future offshore wind resources in the South China Sea under climate change by regional climate modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113865, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113865.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. AR5 Synthesis Report - Climate Change 2014 (ipcc.ch).

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

JANKEVICIENE, J.; KANAPICKAS, A. Projected Wind Energy Maximum Potential in Lithuania. **Applied Sciences**, v. 13, p. 364, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13010364>.

JOHNSON, D. L.; ERHARDT, R. J. Projected impacts of climate change on wind energy density in the United States. **Renewable Energy**, v. 85, p. 66-73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.005>.

JIANG, Y *et al.* Projections of Wind Changes for 21st Century in China by Three Regional Climate Models. **Chinese Geographical Science**, v. 20(3), p. 226-235, 2010. DOI: 10.1007/s11769-010-0226-6.

JUNG, C; SCHINDLER, D. Changing wind speed distributions under future global climate. **Energy Conversion and Management**, v. 198, p. 111841, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111841>.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, 2010.

MARTINEZ, A.; IGLESIAS, G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150580, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150580>.

MARTINEZ, A; IGLESIAS, G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150580, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150580>.

MARTINEZ, A; IGLESIAS, G. Wind resource evolution in Europe under different scenarios of climate change characterised by the novel Shared Socioeconomic Pathways. **Energy Conversion and Management**, v. 234, p. 113961, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113961>.

MORADIAN, S.; AKBARI, M.; IGLESIAS, G. Optimized hybrid ensemble technique for CMIP6 wind data projections under different climate-change scenarios. Case study: United Kingdom. **Science of the Total Environment**, v. 826, p. 154124, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154124>.

NOAA. National Oceanic and Atmosphere Administration. The First Climate Model, 2017.

PEREIRA, E. B *et al.* The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v.49, p. 107-110, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.053.

PODRASCANIN, Z.; DJURDJEVIC, D. The influence of future climate change on wind energy potential in the Republic of Serbia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, p. 209–218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03086-2>.

RUFFATO-FERREIRA, V *et al.* A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: Hydroelectricity and wind energy in the face of climate

change scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 1124-1137, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.020>.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, v. 14, p. 207–222, 2003. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8551.00375>

WU J. *et al.* Future changes in wind energy potential over China using RegCM4 under RCP emission scenarios. *Advances in Climate Change Research*, v. 12, p. 596-610, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.06.005>.

ZHANG, F *et al.* Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, p. 443-451, 2018. DOI: 10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.004.

ZHANG, S.; LI, S. Future projections of offshore wind energy resources in China using CMIP6 simulations and a deep learning-based downscaling method. **Energy**, v. 217, p. 119321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119321>.